Objets communicants, interfaces multimodales et création artistique

Guillaume HUTZLER*, Bernard GORTAIS, Gérard POULAIN*****

*** LaMI - UMR 8042 CNRS / Université Evry -Val d'Essonne**

**** Laboratoire d'informatique de Paris VI**

***** FT R&D / DIH / D2I**

Résumé : Comment une démarche de création artistique peut-elle contribuer à développer une interface multimodale générique intégrant des objets communicants ? A priori les domaines sont éloignés, de par leurs publics et de par leurs logiques. Il n'en est rien ! Sans pour autant les confondre, ils se complètent et s'enrichissent mutuellement en ouvrant de nouvelles voies de recherches, propositions, solutions. C'est ce que nous essayons dans cet article d'argumenter sinon de démontrer.

Mots clés : Raisonnement scientifique, création artistique, interface, multimodal, objets communicants

1 Introduction

Une des grandes critiques des premiers travaux en Intelligence Artificielle a été que l'on essayait de produire des artefacts désincarnés qui, contrairement à l'homme qui apprend au contact de son environnement, possèdent dès le départ toute la connaissance et toute l'intelligence nécessaire à leur bon fonctionnement. C'est cette hypothèse d'inscription physique qui est maintenant prise en compte par l'IA Située. Dans le même temps, les systèmes informatiques qui fonctionnaient d'abord de manière isolée, se sont progressivement organisés en réseaux jusqu'à constituer aujourd'hui un réseau de réseaux à l'échelle de la planète dont le plus connu est l'Internet. La capacité de calcul enfin, d'abord limitée aux microprocesseurs des ordinateurs, s'intègre maintenant dans une multitude d'objets de notre vie quotidienne. Les objets communicants intègrent ces trois dimensions puisqu'ils constituent des artefacts situés, qui peuvent dans une certaine mesure percevoir et/ou agir sur leur environnement, qui intègrent une capacité même limitée de calcul, et qui peuvent communiquer avec d'autres.

Les objets communicants posent alors deux questions nouvelles : celle d'une part de l'organisation de ces « sociétés » d'objets pour permettre, sinon leur coopération, du moins leur cohabitation harmonieuse ce qui signifie au moins la nécessité de se partager certaines ressources. La question d'autre part, de la place de l'homme au sein de ces nouvelles sociétés artificielles et la possibilité pour lui d'interagir de manière efficace avec un objet ou un groupe d'objets. Ce sont ces problématiques qui nous abordons dans le projet *Mises en Scènes*, en mettant en scène un danseur humain qui doit intégrer dans sa performance chorégraphique une interaction permanente avec des objets qu'il observe et qui l'observent. A travers la performance artistique, c'est donc à un dialogue multimodal entre l'homme et les objets communicants que nous nous intéressons.

1.1 Nouvelles technologies et création artistique

Depuis plus d'un siècle, la communication de l'information utilise des réseaux dont les codes sont spécifiques. Presque tous les domaines professionnels ont été investis et instrumentalisés par les systèmes et réseaux multimédias. Le domaine de l'art n'y échappe pas. Notre époque, période de transition rapide entre un mode de production industriel dominant et une prépondérance des services d'information, est caractérisée par la présence concomitante de démarches de créations très différentes relevant de traditions artistiques variées. Il n'y a pas de progrès en art, c'est connu. Un instantané des expositions d'art ayant lieu en France montrera que l'on peut y trouver simultanément des démarches artistiques qui vont de l'époque préhistorique à nos jours, utilisant un éventail varié de technologies.

Parmi celles-ci, on trouvera aussi les nouvelles technologies de l'information et de la communication. Naturellement, car la démarche artistique consiste à répondre aux questions posées par son époque. Aujourd'hui, les systèmes informatiques sont de plus en plus en plus autonomes. Ils deviennent et deviendront de plus en plus expressifs et intelligents En passant du « servomécanisme » au « cerveau-mécanisme », les objets communicants débarquent, s'expriment, analysent, apprennent et collaborent avec nous. Mais cette collaboration ne s'effectue pour le moment qu'au prix d'un apprentissage par l'utilisateur des modes d'expression et de communication de ces objets. Certaines démarches de création artistique se confrontent à cette évolution. Elles intègrent les systèmes informatiques et les objets communicants comme matières de création. Elles associent le raisonnement scientifique et le processus de création artistique sans opposer l'un à l'autre. Elles se fournissent, mutuellement, matière à penser et à créer, sans renoncer à leur fonction primordiale de connaissance et d'ouverture. C'est dans ce cadre que se situe le projet *Mises en Scènes*.

1.2 Etablir un dialogue créatif entre un danseur-acteur et un système

Objectifs

Ce projet baptisé *Mises en scènes* vise à développer un dispositif expérimental mettant en relation un danseur-acteur avec un système informatique graphique et sonore « intelligent » par l'intermédiaire de modalités d'interaction les plus naturelles et intuitives possibles. Du point de vue créatif, il s'agit de mettre en place un dialogue entre le danseur et le système informatique : les gestes et les déplacements du danseur sont une proposition qui guide ou oriente simplement la réaction du système informatique, réaction qui se traduit sous forme visuelle par la génération d'images et sous forme sonore par la génération de séquences musicales ; dans un mouvement symétrique, le danseur réagira à son tour à la réponse visuelle et sonore proposée par le système informatique.

Du point de vue informatique, c'est toute la question de l'interface entre l'homme et la machine qui se trouve ainsi posée sur des bases nouvelles et potentiellement riches de sens. Il s'agit en effet, pour la machine, d'une part de percevoir et d'interpréter ce que l'utilisateur humain lui propose d'une manière qui n'est qu'en partie formalisable et formalisé, et d'autre part de générer en retour une réponse multimodale en correspondance avec la proposition exprimée.

La plate-forme ainsi définie, constituée d'agents intelligents et d'objets communicants en réseau peut être considérée par le metteur en scène comme un partenaire possible pour la conception d'un spectacle, grâce à ses capacités d'apprentissage dans une première phase de répétitions, et l'exécution de ce spectacle, grâce à ses capacités d'interprétation de l'activité d'un danseur et de production autonome de séquences d'images et de musique.

On aboutit alors à de nouvelles

- interfaces de prise, contrôle d'information en retour sur l'effet produit et ressenti ;
- interactions relationnelles entre acteurs d'une part, acteurs et réalisateurs d'autre part, acteurs et public enfin ;
- interprétations sémantiques tenant compte de différenciations propositionnelles.

Dispositif expérimental

Le danseur-acteur humain qui effectuera sa performance sur la scène sera en interaction avec un système informatique autonome, sorte de partenaire numérique avec lequel il devra établir un dialogue créatif. Pour que cela soit possible, il faut que le système lui-même perçoive et analyse la performance du danseur humain, imagine une réponse « convenable » à cette performance et enfin la réalise. Cela correspond aux 3 phases que suit tout agent autonome : perception, décision, action (voir figure 1).

Autrement dit, il s'agit de prévoir :

- comment le module de perception représentera la performance du danseur de manière à permettre au module de décision de choisir la réponse à donner ?
- comment le module de décision représentera la réponse que le système devra réaliser grâce au module d'action ?

Par ailleurs, pour pouvoir établir un dialogue entre le danseur et le système, il est nécessaire de poser les bases d'un langage commun entre les deux. Qu'il s'agisse de faire dialoguer ensemble deux modules du système ou bien le système et le danseur, il est nécessaire dans chaque cas de définir :

- une sémiologie commune de manière à ce que chacun comprenne l'autre - le quoi ?
- une plate-forme technique commune de manière à ce qu'ils puissent effectivement communiquer - le comment ?

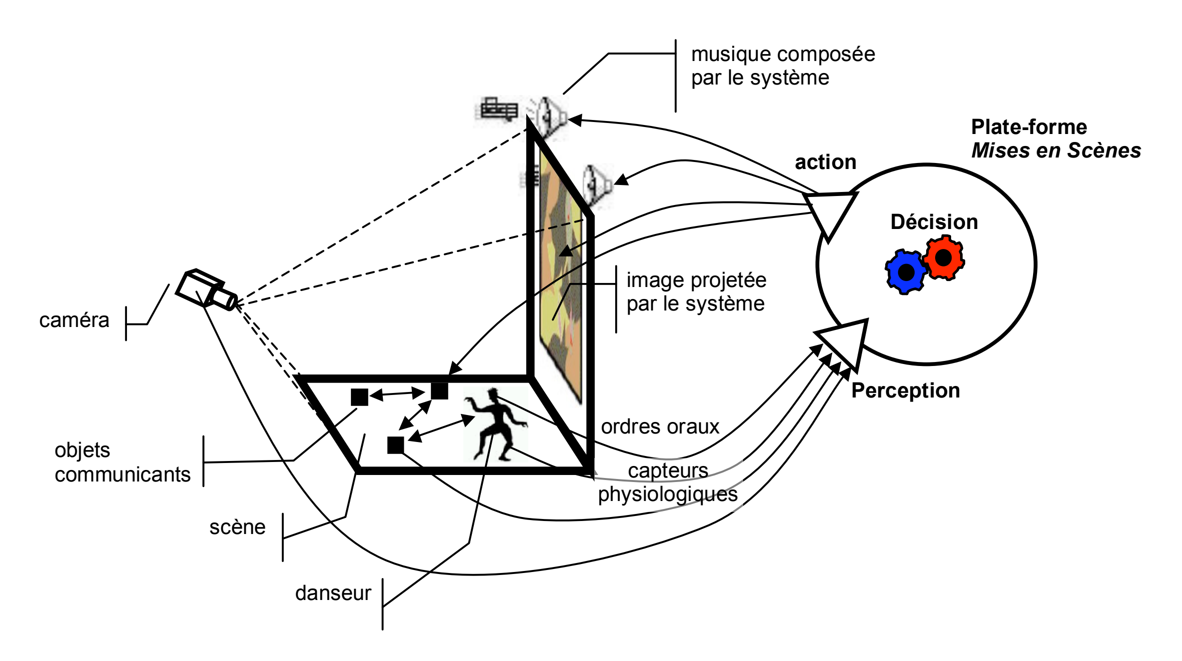


Figure 1. Le système informatique autonome perçoit les évolutions du danseur par l'intermédiaire de capteurs appropriés, décide d'une réponse adaptée et la réalise.

Du point de vue sémiologique, l'approche adoptée consiste à analyser de manière similaire les différents champs d'expression en jeu dans le spectacle imaginé (la danse, la musique, la peinture et la mise en scène), sous la forme de paires de qualités (par exemple chaud-froid). Chaque paire de qualités peut être représentée par une valeur quantitative, et la mise en scène du spectacle pourra se fonder sur l'écriture de partitions indiquant, au cours du temps, l'évolution de chacune de ces qualités (voir paragraphe 4.2). Ces partitions, permettant d'analyser la dynamique de l'interaction entre danseur et système, doivent autoriser les trois modules du système autonome (perception/décision/action) à communiquer les uns avec les autres.

Danseur et objets physiques communicants

Le dispositif expérimental tel qu'il a été défini dans un premier temps ne fait intervenir qu'un seul danseur et un système informatique multimédia. Du point de vue de la mise en scène, il est cependant intéressant d'introduire des objets présents sur la scène, que le danseur peut utiliser. Les objets physiques communicants, connectés en réseau, qui ont habituellement pour fonction d'offrir des services aux utilisateurs, auraient ici le rôle d'accessoires ou d'éléments de mise en scène actifs. Ces objets physiques communicants sont dotés :

- d'une interface avec le réseau informatique qui les relie ;
- de capacités de traitement de l'information ;
- de capteurs et/ou d'actionneurs.

Ces caractéristiques leur permettent d'interagir entre eux et avec l'utilisateur. En interaction physique avec leur environnement au sens large, ces objets physiques communicants peuvent :

- modifier leur état ;
- agir sur les autres objets ;
- interagir avec l'utilisateur ;
- interagir avec leur environnement.

Le terme d'objets communicants regroupe en fait un ensemble de dispositifs numériques très différents, aux capacités d'interaction diverses. Les objets dits « communicants » peuvent soit percevoir l'action d'un utilisateur (capteurs de direction, de distance, d'accélération, de température, de contact, etc.), soit restituer une information pour l'utilisateur ou effectuer des actions (écrans, moteurs pas à pas), soit encore permettre le contrôle d'autres objets par l'utilisateur (télécommandes,

PDAs, etc.). Ces objets peuvent devenir autant d'acteurs participant directement à la dynamique de la performance du danseur et du spectacle en général. Par l'utilisation de « tags » (badges actifs ou passifs), ces objets peuvent permettent une localisation simple du danseur sur la scène. Au final, plus qu'un dialogue entre un danseur et un système d'agents logiciels, le spectacle se composera d'un dialogue entre performeurs humains, objets physiques communicants et agents logiciels de composition multimédia.

Assistance opérationnelle

Cet outil constitue un assistant personnel sous forme de prothèse intelligente, d'instrument de capture, de modèle d'interprétation partagé. Trois exemples pour illustrer cette assistance opérationnelle :

- *un instrument de capture* : les interfaces de type capteurs sensoriels à distance ou placés sur le corps, de type caméra vidéo ou positionneurs dans l'espace, constituent autant de sources de pistage du positionnement, de la gestuelle, de l'état physique et émotionnel d'un artiste au cours d'une représentation ;
- *un modèle d'interprétation partagé* : les retours relationnels de ressentis d'un autre acteur, du réalisateur, des spectateurs, constituent autant de guides pour l'artiste en scène pour savoir où il en est, en phase ou en décalage, les affects qui fonctionnent le mieux, les environnements qui augmentent ou diminuent la résonance émotionnelle ;
- *un interprète* : les grammaires et grilles d'interprétation de gestes, de rythmique, de postures, de couleurs et de sons permettent d'explorer de nouvelles formes de représentation et de mise en scène.

Dans ce projet, l'analyse, en terme de modélisation d'activité d'interprétation n'est pas éloignée des tâches informatiques courantes et des communications fonctionnelles. On en trouve des illustrations dans la prise en compte des événements informels et émotionnels des systèmes de travail collaboratifs.

2 Analyse des interfaces, des comportements et gestes d'un danseur

Pour analyser, appliquer et illustrer les directions d'exploration portant respectivement sur les représentations individuelles, communes et collaboratives d'un coté, sur les mutations des rôles et de leur partage entre les humains et les systèmes de l'autre, il nous a semblé que l'activité d'un danseur, dans une mise en scène lors d'un événement de représentation pouvait nous servir de support d'exploration et d'exemple d'illustration. Cette mise en scène est accompagnée et renforcée :

- à l'aide de dispositifs physiques d'observation et de capture d'information d'une part (objets communicants), de production de propositions et médiations de l'autre (agents intelligents) ;
- à terme, paramétrable par des fonctions d'interface simplifiées pour offrir la possibilité de créer une œuvre multimédia enrichie et de la mettre en scène en s'appuyant sur une partie stable. La partie variable évoluera de manière dynamique, fonction de critères liés à la perception des contenus, des mouvements, des humeurs de chacun des acteurs et d'un public donné.

2.1 La perception du spectacle par le système

La perception du spectacle concerne l'analyse, par le système, de tout ce qui lui est extérieur, c'est-à-dire notamment ce qui se passe sur la scène et dans le public. Cela concerne en particulier tous les déplacements du danseur, ses attitudes corporelles et gestuelles, sa physiologie (rythme cardiaque, respiration, tension superficielle de la peau, etc.), ses paroles, et plus généralement toutes ses interactions avec son environnement (objets, autres danseurs, public, etc.).

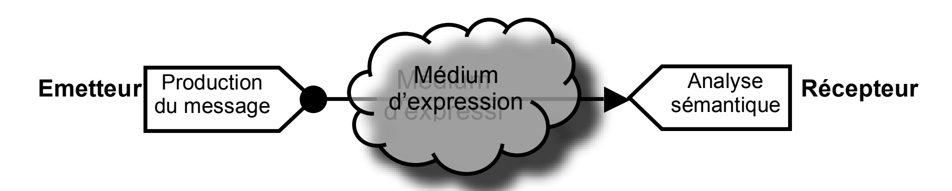
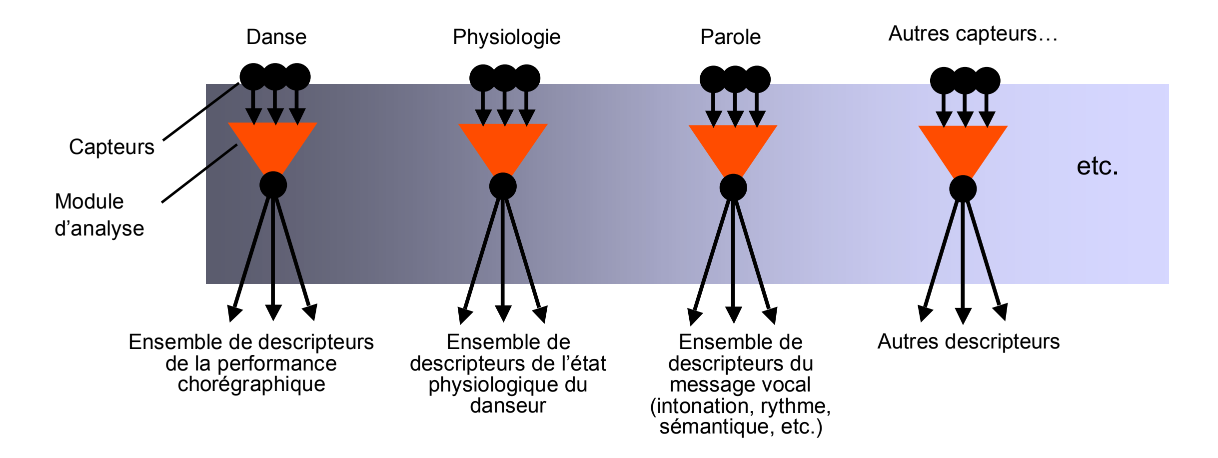


Figure 2. Principe général de communication d'un message (gestuel, langagier, physiologique, etc.)

Cette analyse est une étape d'abstraction pour traduire les perceptions brutes du système en termes de « qualités » telles que définies au paragraphe précédent, puis en partitions de qualités. Elle s'effectuera en considérant chaque médium d'expression comme le support d'une communication dont la phase



préalable d'analyse permettra de définir les mots, la syntaxe et la sémantique (figure 2).

Figure 3. Modèle client-serveur de la plate-forme Mise en scène

Du point de vue technique, cette opération de perception pourra s'effectuer de manière modulaire par autant de composants autonomes que nécessaires, ces composants pouvant s'inscrire indépendamment auprès du système selon un modèle client-serveur (figure 3).

2.2 Déplacements et mouvements du danseur

Nous abordons ici la question de la caractérisation en temps réel de la performance du danseur. Deux éléments sont principalement concernés par cette caractérisation : le positionnement du danseur sur la scène (et donc ses déplacements), et ses attitudes corporelles (donc ses gestes). Il s'agit donc d'une part de capter en temps réel la position et l'attitude du danseur, et d'autre part d'analyser les séquences de positions et d'attitudes pour en tirer des informations sur la dynamique de la chorégraphie.

Contraintes

Il existe différentes techniques de capture de mouvement mais leurs performances ne sont pas équivalentes compte tenu de nos critères :

- la perception : elle doit être aussi précise que possible mais il est possible de travailler et de faire des choses intéressantes même avec une précision faible ;
- le temps de réponse : l'interaction doit se faire en temps réel ; la perception doit donc non seulement s'effectuer en temps réel mais également laisser du temps de calcul aux autres opérations nécessaires (décision, réalisation de la performance) ;
- le dispositif : il doit être le plus discret possible pour ne pas centrer la scénographie autour de la technologie, et le plus transparent possible pour ne pas entraver le danseur dans ses évolutions chorégraphiques ;
- le coût : le plus bas possible…

Etat de l'art

Les principales techniques développées pour la capture de mouvement sont les suivantes :

- **les systèmes à base de traqueurs** qui fonctionnent grâce à la présence sur le danseur d'un certain nombre de capteurs (en général une trentaine) dont le déplacement est ensuite analysé par un système approprié. Il peut s'agir suivant les cas de diodes électroluminescentes, électromagnétiques ou encore hybrides :
  - \+ ces techniques présentent l'avantage d'être très précises et de fonctionner en temps réel ; elles ont cependant un coût élevé ;
  - \- la technique optique présente des problèmes de masquage (diodes non visibles par les

caméras dans toutes les positions) ;
  - la technique magnétique pose quant à elle des problèmes de tremblement, de fragilité des capteurs, de complexité de l'installation (notamment perturbation du champ magnétique) ;

- **les combinaisons de données** qui fonctionnent sur le principe des gants de données (data glove) maintenant largement répandus dans le domaine de la réalité virtuelle. Au lieu de ne capter que les mouvements de la main, ces combinaisons habillent tout le corps et permettent donc de suivre les mouvements chacune des parties du corps :
  + ces systèmes présentent un certain nombre d'avantages : le prix, la rapidité d'acquisition, la stabilité des mesures, et le faible encombrement du dispositif ;
  - l'inconvénient majeur est qu'il s'agit de dispositifs très contraignants pour les danseurs qui sont limités dans leurs mouvements, notamment au niveau de certaines articulations.

- **l'analyse d'images vidéo** par laquelle le danseur est modélisé sous la forme d'un système articulé de polygones dont il s'agit de suivre les mouvements grâce à une caméra :
  + cette technique ne nécessite aucun appareillage sur le danseur, à part éventuellement un habillement permettant de distinguer facilement les différentes parties de son corps. Le seul matériel nécessaire consiste en une (ou plusieurs) caméra(s) qui filme(nt) ses mouvements ;
  + l'acquisition est rapide ;
  + le coût est très faible ;
  - le défaut principal de cette technique concerne la relative imprécision de la perception obtenue.

Techniques envisagées

Au vu de cette présentation synthétique des différentes solutions existantes, notre choix s'est porté, dans une première approche, sur la technique la moins contraignante pour le danseur, et la plus économique : celle d'analyse d'images vidéo (figure 4). Si par la suite, la précision obtenue s'avère insuffisante, d'autres techniques plus lourdes pourront être envisagées en complément.

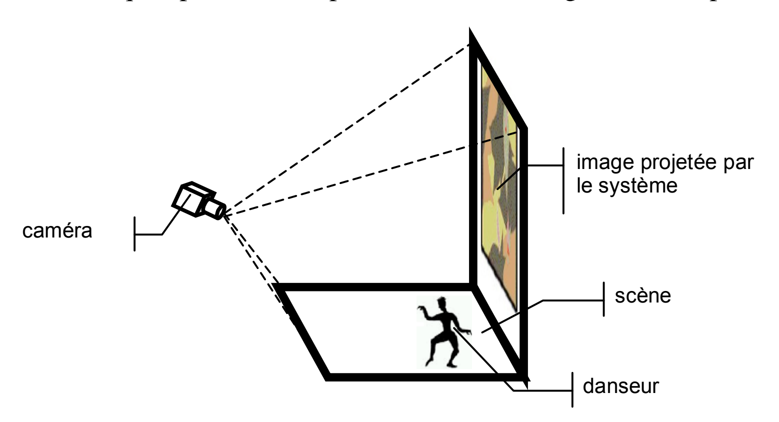


Figure 4. Perception de la performance du danseur par le système

Dans le dispositif envisagé, une caméra filme la scène de manière continue. La position exacte de la caméra (face à la scène, à 45° comme sur la figure ci-dessous ou à l'aplomb de la scène) sera à préciser selon les résultats des premières expérimentations. Un modèle 3D de la scène devra être développé pour faciliter la reconnaissance de la position et des postures du danseur. La reconnaissance des mouvements du danseur s'effectue en plusieurs étapes :

- un ensemble de descripteurs primitifs est extrait de l'image vidéo : boîte englobante, direction du déplacement, (haut/bas, avant/arrière, gauche/droite), dynamicité (accélération / ralentissement). Ces descripteurs peuvent être complétés par des informations de fiabilité. Les Webcams du marché sont vendues avec des logiciels qui font déjà une partie de ce travail ;
- ces descripteurs peuvent ensuite être exploités, en complément d'infos structurelles sur le corps humain, pour la détermination de la position du danseur sur la scène et la reconnaissance de postures ;

- les descripteurs primitifs, la position, les postures doivent enfin être analysés dans le temps pour en retirer des informations sur les rythmes des séquences chorégraphiques. Il s'agit par exemple de caractériser les trajectoires du danseur (rectiligne/courbe, régulière/irrégulière, continue/discontinue).

3 Analyses des interactions relationnelles

En parallèle et de manière conjointe, il s'agit d'observer, d'expliciter, de maîtriser la « *mutation des processus d'organisations relationnelles* » basées sur la répartition fonctionnelle classique des rôles, à celles basées sur les nouvelles interpolations lors d'une création de type événementielle (nouvelles répartitions de rôles de scènes, systèmes, acteurs et publics, en interaction continue). On modélise les processus qui régissent les passages d'un modèle à l'autre :

- d'un système classique à un système multimédia intentionnel et dynamique ou tous les acteurs sont présents simultanément et actifs ;
- passage d'une disposition de scène dite à l'italienne (public, scène, décor, machinerie) à une disposition d'espace commun partagé et évolutif.

La mise en scène d'un événement interactif mettant en relation un danseur/acteur et le système, émerge des recherches sémantiques et logicielles. Il existe aujourd'hui des recherches artistiques dans le monde des arts qui vont dans le même sens que la nôtre. Voyons de quelle manière le projet *Mises en Scènes* se singularise par rapport aux autres projets.

3.1 Etat de l'art

Nous nous situons dans un ensemble de créations qui utilisent des capteurs comme moyens d'information sur l'environnement. Nous nous servons des systèmes informatiques comme partenaires de création. Dans ce cadre, il existe plusieurs approches qui vont de l'approche scriptée à l'approche comportementale. L'approche scriptée consiste à déclencher un script précis qui produira toujours le même effet dans les mêmes circonstances. Ce type de système, dont un exemple typique est le CD-Rom, constitue encore la base de la plupart des interactions dans les créations artistiques technologiques. Ce principe d'interaction est rigide, son effet souvent prévisible et par conséquent préjudiciable au jeu de l'acteur et à la qualité du spectacle. Il conduit l'acteur à adopter un comportement d'explorateur cherchant toutes les solutions possibles dans le système au détriment de l'expression de l'émotion.

Nous utilisons un système multi-agent, c'est-à-dire un ensemble d'entités réelles ou virtuelles interagissant dans un environnement qu'ils sont capables de percevoir et sur lequel ils peuvent agir, et communicant les uns avec les autres. Les agents ont un comportement autonome, possèdent des connaissances, et peuvent prendre des décisions en fonction d'un but. Dans *Mises en Scènes* les agents constituent une troupe de spectacle formée d'agents musiciens, d'agents danseurs, d'agents plasticiens, d'acteurs multimédia, etc. Ils œuvrent en commun mais chacun à leur manière à l'accomplissement des vœux du metteur en scène ou de l'acteur. Ceci donnera lieu à une succession de cycles d'apprentissage supervisé au cours desquels le fonctionnement du système sera adapté en fonction de la satisfaction ou non du metteur en scène ou de l'acteur à son égard. L'interaction entre le système et l'acteur ne se présente jamais deux fois exactement de la même manière puisque le but des répétitions est de définir un espace d'improvisation cohérent pour l'acteur, le metteur en scène et le système. Le système intentionnel peut être en partie ou totalement bridé pour être transformé, si cela est nécessaire, en système scripté. Plus le système est scripté et plus on se rapproche des méthodes de mise en scène traditionnelles. Plus le système est autonome, moins il est répétitif. L'œuvre devient alors un organisme vivant impliquant une prise de risque et une vigilance permanente.

Techniquement, nous nous rapprochons des recherches faites au MIT par F. Sparacino, G. Davenport et A. Pentland [31]. Nous utilisons comme eux des capteurs en relation avec un système intentionnel multi-agent. La démarche diffère par l'utilisation que nous faisons des partitions de qualités (cf 1.2.) qui permettent la représentation homogène de différentes modalités d'expression multimédia. Notre proposition s'appuie en effet sur les connaissances sémantiques des différents champs d'expression qui permettent de décrire un comportement multimédia global semblable à ceux

que l'on observe dans la réalité. L'existence d'un langage multimédia permet d'indiquer au système, à l'aide notamment d'une interface vocale, les états de la mise en scène vers lesquels le système doit globalement tendre. Les agents sont autonomes et s'organisent suivant ce but. Avec W. Kandinsky [21], pour qui tout phénomène du monde intérieur ou du monde extérieur peut trouver son expression linéaire, nous considérons que la mise en scène a une expression linéaire dans laquelle chaque point de la ligne représente la tension entre l'acteur et l'état du système à un moment donné, et définit donc le but assigné au système.

3.2 Conception de l'événement interactif

Objectif général

Il est trop tôt pour décrire une mise en scène qui ne commencera à émerger qu'après une période de réflexion et de création, tant sur le plan scientifique que sur le plan artistique. Les partenariats et le contenu de l'événement interactif proprement dit résulteront naturellement des rencontres et des relations que la recherche permettra de nouer. Il s'agit d'un processus de création et, en tant que tel, il est nécessaire qu'il reste ouvert le plus longtemps possible.

Nous pouvons cependant souligner les contraintes du dispositif expérimental de *Mises en Scènes*, elles nous sont données par le système lui-même et nous prendrons appui sur elles. Nous ne perdrons pas de vue, tout au long de ce projet, que l'événement interactif final est à la fois un moyen de valider une nouvelle forme d'interface homme-machine, et la mise en œuvre d'un dispositif expérimental dans lequel le système est un outil au service de la création.

Système multi-agent et dispositif

Les systèmes multi-agents (SMA) sont constitués d'agents autonomes. Ils sont souvent utilisés pour étudier les phénomènes sociaux : comportement des sociétés de fourmis, systèmes proies et prédateurs, écosystèmes, etc. Nous utiliserons cette affinité particulière qui existe entre les SMA et la représentation de la société. L'acteur sur la scène est en immersion dans le système multi-agent comme l'homme l'est dans le monde. Le système multi-agent constitue un bon moyen de représenter un monde de réseaux où le centre n'existe pas et dans lequel des groupes d'éléments autonomes interagissent à la fois suivant des règles de comportement et suivant le hasard.

Metteur en scène, acteurs et danseurs « augmentés »

Le projet *Mises en Scènes* a pour but de proposer une plate-forme interactive basée sur le comportement, et utilisable comme outil de création par les autres artistes. L'outil devrait permettre à l'acteur d'augmenter ses moyens d'expression traditionnels en les amplifiant, en les traduisant en séquences multimédia. La plate-forme communicante transforme à la fois la conception et l'exécution de l'œuvre. Dans la phase de conception, les réponses que donne le système aux propositions de l'acteur ou du metteur en scène peuvent dépasser son imagination et le surprendre tout en lui convenant sur le plan de la mise en scène. Dans la phase d'exécution, le public, dont l'activité peut être perçue par le système, peut interagir avec le système et le danseur dans un but de mise en scène.

Enfin, nous pouvons envisager des installations où le public dialogue directement avec le système multimédia sans la présence d'un acteur.

Les arts du temps

Les différents médias ont en commun d'être tous des arts du temps. La chorégraphie, la musique, les ambiances sonores, le théâtre, les arts plastiques, la vidéo, les marionnettes - souvent séparés les uns des autres pour des raisons techniques et culturelles - deviennent pour le système des manières particulières de traiter le son (la voix, la musique, les ambiances sonores, le chant), la lumière (la lumière, les couleurs, les formes), le mouvement (les déplacements, la danse, l'acrobatie, les gestes) (figure 5).

Dans *Mises en Scènes,* tous les arts du temps se retrouvent potentiellement sur la même plate-forme. Nous chercherons les éléments d'un langage commun par l'analyse des éléments sémantiques et l'expérimentation. L'utilisation de ce nouveau genre d'interface comme outil de création remet en question les cadres traditionnels des arts de la scène. Nous pouvons envisager la création d'événements interactifs hybrides. Nous conduirons la réflexion sur ce point avec les professionnels des différents médias. Puisque le temps est l'élément commun à tous les acteurs, réels et virtuels de la

mise en scène, nous chercherons dans quelle mesure les structures utilisées dans la composition musicale (contrepoint, fugue, choral, etc.) peuvent nous fournir la structure globale qui permet aux différentes expressions d'interagir et de se développer de façon autonome, comme autant d'instruments au service d'une polyphonie, leur rapport étant d'autant plus fort qu'il est arbitraire.

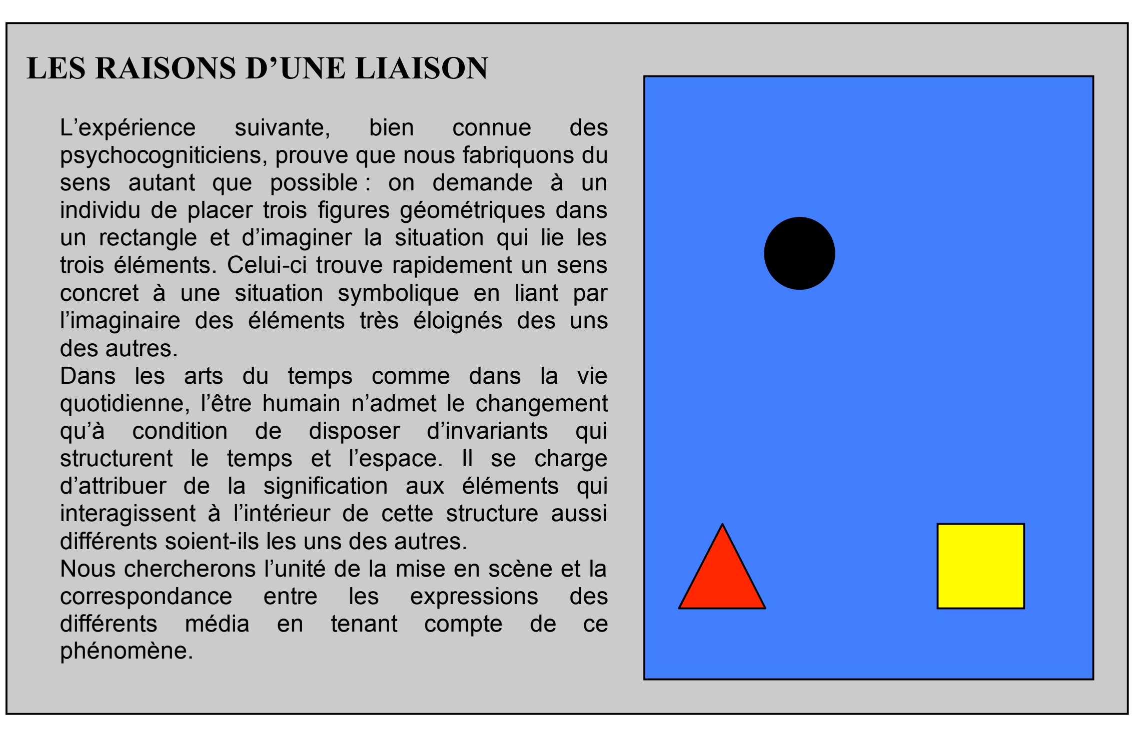


Figure 5. les raisons d'une liaison

3.3 Ergonomie

La métaphore de la scène

Le projet *Mises en Scènes* permet de mettre en situation les relations multimodales que l'être humain est amené ou va être amené à entretenir avec la machine dans un futur proche. Nous sommes déjà entourés, dans les lieux publics, de travail ou d'habitations, d'artefacts et d'objets communicants. Un adulte des pays industrialisés est aujourd'hui (selon une étude citée par M. Weiser [37]) environné par une moyenne de 40 microprocesseurs enfouis, dont 5 capables de communiquer via des réseaux (câblés, électriques, sans fil, téléphoniques, etc.). Il est généralement estimé que, d'ici dix ans, nous serons, via les objets de notre vie quotidienne, en contact permanent avec plusieurs centaines de microprocesseurs, dont la majorité sera reliée à ces mêmes réseaux (Internet ou autres).

Mises en Scènes est une plate-forme grâce à laquelle ce nouveau monde d'interfaces homme-machine intelligentes, permettant des relations sémantiques intuitives, gestuelles, sonores ou visuelles, peut être expérimenté. Dans le cadre du projet *Mises en Scènes* sont étudiés les processus psychologiques, sensoriels, cognitifs et émotionnels mis en jeu par les interactions interpersonnelles, de manière à permettre au système de générer des réponses face aux sollicitations de l'acteur humain. Il peut contribuer à fournir des modèles d'analyse de l'activité des acteur/danseur et plus généralement de l'utilisateur interagissant avec les systèmes sensibles qui l'entourent. Il constitue un support de recherche sur les modèles explicatifs des comportements, en remplaçant l'acteur par un ou des utilisateurs et le scénario du dispositif interactif expérimental par un scénario de la vie quotidienne.

Sémiologies

Tant sur le plan de la recherche que sur le plan de la création, nous aurions intérêt, là aussi, à croiser les connaissances des techniciens, des artistes et des ergonomes. Les relations métaphoriques qui existent entre la scène du dispositif expérimental et la vie quotidienne, comme entre l'acteur et

l'utilisateur de NTIC, devraient être explorées avec les ergonomes de France Télécom. Nous nous baserons non seulement sur la sémiologie des champs d'expression multimédia mais aussi sur les

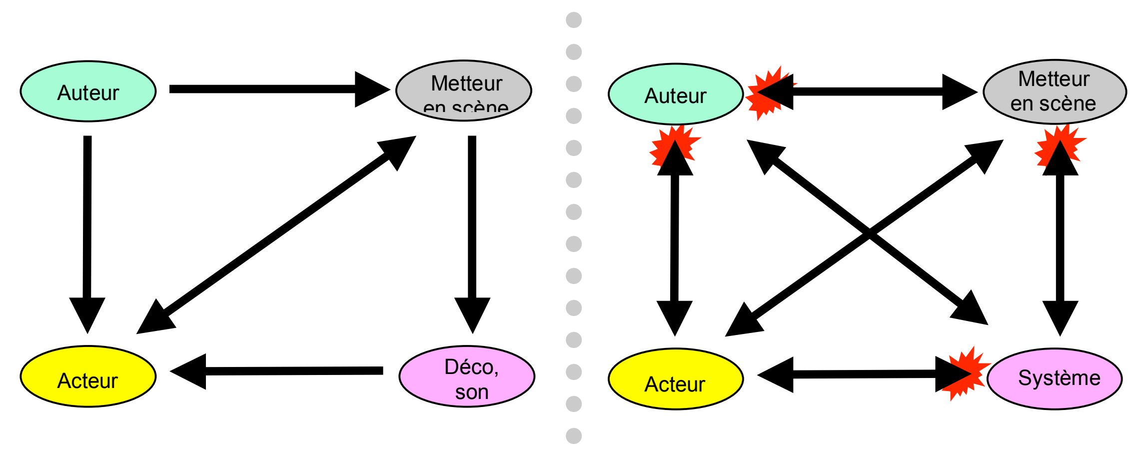


Figure 6. Relations entre les fonctions du dispositif expérimental
A gauche, système « classique ». A droite : système multimédia intentionnel dans lequel tous les différents partenaires de la mise en scène sont en relation bidirectionnelle les uns avec les autres, chacun pouvant influer sur tous les autres

modélisations des fonctions et de l'espace du dispositif interactif.

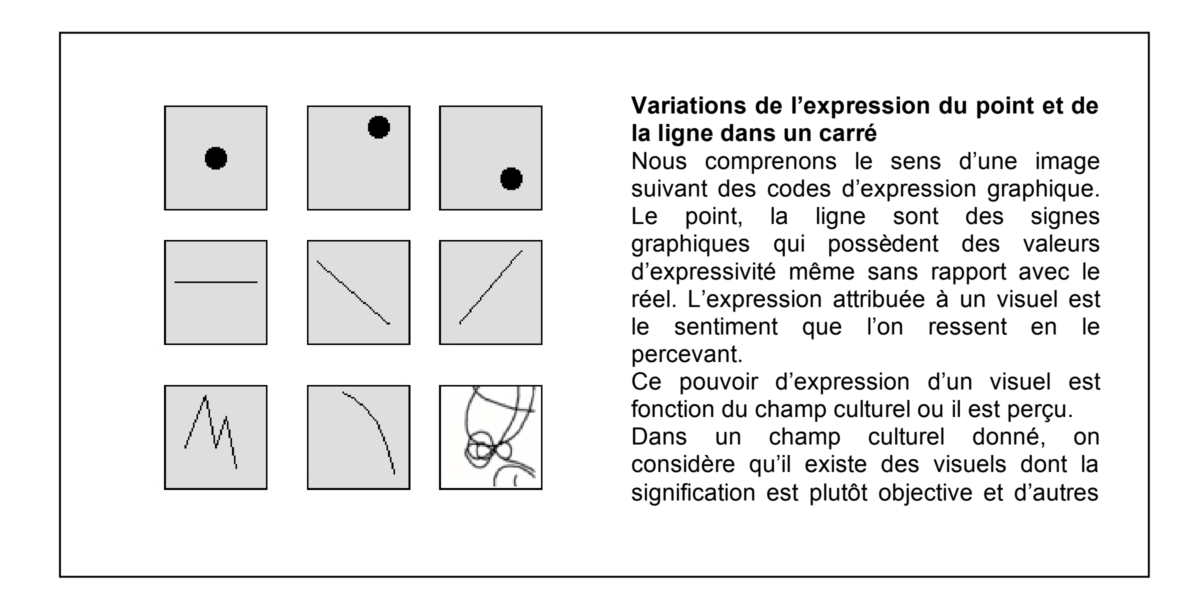
L'analyse de la spécificité du système passe par l'analyse de la relation des éléments qui le composent. Il est nécessaire pour la conception de l'interface homme-machine de repérer et de modéliser les différentes fonctions qui entrent en jeu dans un spectacle traditionnel — l'auteur, l'acteur, le danseur, le décorateur, le musicien, le régisseur, etc. — et d'observer la mutations de ces fonctions lors d'une création du type *Mises en Scènes*. Nous obtiendrons également des renseignements précieux en modélisant l'espace scénique traditionnellement composé des espaces techniques, des éléments de décor, de la scène, de l'espace réservé au public et du lieu théâtral.

La sémiologie des différents médias de la scène n'est pas très différente de la sémiologie des médias utilisés dans la vie quotidienne. L'interface multisensorielle de *Mise en Scène* permettra en premier lieu à un groupe d'acteurs de créer sa propre image. Celle-ci pourra dans un deuxième temps être utilisée par le système pour proposer une réponse à une situation en se comportant comme un partenaire virtuel multimédia. Le projet *Mise en Scène* devrait permettre d'analyser les caractéristiques cognitives et physiques du comportement des usagers et, par-delà le comportement physique, les aspects mentaux de l'interaction (perception, mémorisation, raisonnement…). L'étude sémiologique des différents champs d'expression et l'utilisation expérimentale de *Mises en Scènes* devrait permettre de faire émerger un langage multimédia permettant de créer une véritable plate-forme de communication.

4 Analyses des interprétations sémantiques

En parallèle et en complément, il s'agit d'analyser les « *significations informationnelles et émotionnelles* » des interactions entre les objets communicants, les humains, les activités et les systèmes, afin de valider des modèles de générations de nouvelles formes enrichies de communication qui soient suffisamment explicites et explicatifs pour les rendre efficaces, maîtrisables et évolutifs en temps réel et dans le sens d'une meilleure humanisation des interfaces. On s'appuie sur la modélisation d'activités artistiques, par nature complexes et fortement chargées en significations et émotions en utilisant :

- une analyse sémantique de type significations des positionnements, gestes, paroles, humeurs
- une analyse sémantique de type représentations visuelles et scéniques par média et support (danse, musique, peinture)



4.1 Analyse des champs d'expression artistique

Il existe un champ analytique dans toute expression artistique dans lequel le créateur essaie de définir la part du système dans son art pour acquérir liberté, détermination dans son geste et décisions.
Le plasticien connaît les lois des couleurs, les architectures qui peuvent sous-tendre une image, la symbolique des formes et des formats, etc. ; le compositeur connaît les lois de l'harmonie, les timbres des instruments, les structures musicales, etc. ; le chorégraphe sait comment établir une partition en décomposant de façon systématique une séquence de mouvements qu'il caractérise par la posture, l'intensité, la trajectoire, etc. ; le comédien connaît aussi une palette de gestes, de types de déplacements et de modulations de la voix propres à servir telle ou telle expression.
Ainsi il existe une sémiologie des signaux visuels, une sémiologie des signaux sonores, une sémiologie du champ d'expression gestuel, une sémiologie de la scénographie. Le processus de création met en relation dialectique le champ d'expression analytique basé sur la sémiologie avec un champ d'expression indéterminé, afin d'exprimer une nouvelle relation. Autrement dit, à un moment donné, un créateur connaît les outils dont il dispose et leur mode d'emploi. Pour organiser et comprendre les données qu'il reçoit, un système créateur doit aussi posséder des fonctions d'évaluation sémiologique.
Une deuxième étape d'analyse consiste à élaborer une correspondance entre les qualités physiques élémentaires identifiées dans chaque champ d'expression et des qualités émotionnelles qui résultent d'une combinaison de qualités physiques. On pourra considérer par exemple que la qualité émotionnelle « tragique » résultera d'une combinaison de luminosité faible, de fort contraste de couleur, de déplacements lents. Ces correspondances, naturellement relatives à une époque et une culture donnée, seront construites en fonction de nombreux exemples puisés dans l'histoire de l'art et dans la signalétique. Elles seront testées par des simulations de situation et des expériences en chambre. (figure 7, encadré sur les constituants)

4.2 Vers une écriture multimédia commune

En transformant, pour chaque moyen d'expression, les valeurs quantitatives obtenues à partir des capteurs ou à partir du système informatique (quantité d'énergie, valeur des couleurs, vitesse de déplacement, intensité sonore, etc.) en qualités comparables (tragique, paisible, chaud, froid, bruyant, calme), nous établissons, pour les différents moyens d'expression, un système de notation commun. En prenant une métaphore musicale, on peut distinguer deux types de notations complémentaires.

A TITRE D'EXEMPLE : QUELQUES ELEMENTS CONSTITUANTS

Eléments constituants du son
- Intensité : elle se mesure en décibels : fort-faible
- Hauteur : du grave à l'aigu ; elle varie suivant la fréquence.
- Timbre : épais-pointu ; compact-diffus ; coloré-incolore ; plein-vide
- Le tempo : lent-rapide

Eléments constituants du visuel
- La teinte : la combinaison des couleurs ; couleurs primaires et couleurs secondaires ; chaud-froid
- La saturation : intensité de la couleur par rapport à son intensité maximale
- La luminosité : valeur de gris de la couleur : sombre-clair
- Le point, la ligne , le plan.

Eléments constituants de la chorégraphie
- La posture : ouvert-fermé
- La trajectoire : lent-rapide ; régulier-irrégulier ; continu-discontinu
- Le tonus : calme-agité.

Figure 7. Exemple de « grille d'improvisation » traduisant la montée d'une tension tragique en quatre phases, avant une

- une première notation qui peut s'apparenter aux grilles d'improvisation en jazz, qui définissent, par périodes temporelles plus ou moins longues, une tonalité générale dans laquelle les musiciens doivent jouer (figure 8). Dans ce cadre, la grille décrit ainsi pour chaque période et pour chaque champ d'expression, les qualités qui doivent la caractériser (calme ou agité, chaud ou froid, etc.) ;

	1	2	3	4	5	...
expression corporelle	paisible	paisible	tragique	tragique	paisible	...
expression musicale	silencieux, rythmique	piano, rythmique	mezzo-forte, arythmique	forte, arythmique	silencieux, rythmique	...
expression plastique	froid, statique	froid, dynamique, lent	chaud, dynamique, lent	chaud, dynamique, rapide	froid, statique	...
expression scénographique	calme, fermé	calme	un peu agité	agité	calme, fermé	...

Figure 8. Exemple de « grille d'improvisation » traduisant la montée d'une tension tragique en quatre phases, avant une phase d'apaisement. Chaque ligne correspondent à l'une des quatre formes d'expression, les colonnes correspondent à une succession d'instants ou de phases de durée plus ou moins longue.

- une deuxième notation qui peut s'apparenter aux partitions musicales classiques, qui définissent précisément quelle est, à chaque instant, la performance à effectuer par chaque musicien. Ainsi chaque qualité peut-elle donner lieu à une description sous forme d'une courbe qui indique son intensité en fonction du temps (figure 9).

Le rôle de la mise en scène sera alors d'établir, en référence à ces qualités comparables, des règles de comportement pour les acteurs de la plate-forme virtuelle et pour l'acteur humain. La performance du danseur telle qu'elle est perçue par le système et la réponse que le système y apporte sont représentées par l'intégrale des grilles de qualité des différents champs d'expression superposés (figure 10). Si l'on considère cette intégrale au cours du temps, chaque champ d'expression peut être regardé comme une partition d'instrument, et l'ensemble des partitions comme la partition de l'orchestre entier. Il sera intéressant d'expérimenter l'usage des formalismes d'écriture utilisés dans la musique contemporaine sur les partitions des grilles, pour imaginer une écriture multimédia temporelle basée sur des partitions émotionnelles.

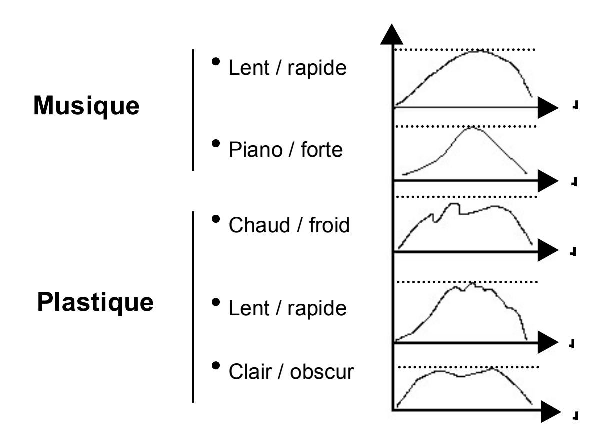


Figure 9. Exemple de « partition » donnant l'évolution de chaque qualité en fonction du temps

5 Résultas attendus

De cette manière on obtient un cadre, un modèle, une méthode et un instrument de production d'événements uniques de par leur caractère non déterministe, non répétitif et enrichi par la perception, la représentation et l'émotion de chacun des interacteurs.

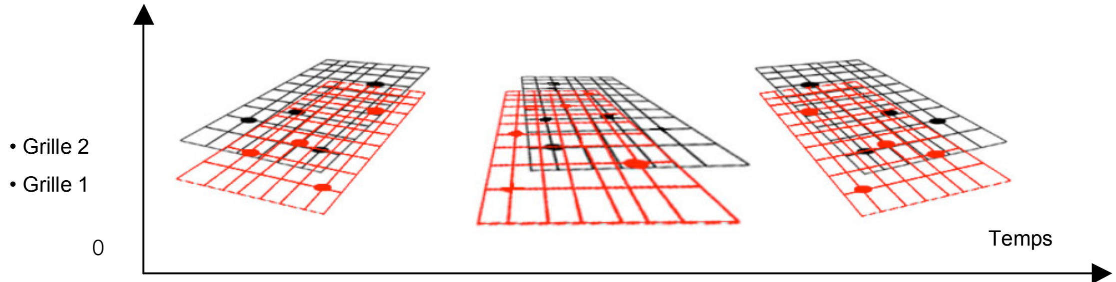


Figure 10. L'intégrale des grilles multimédia constitue la partition de la performance.

Pour y parvenir, il faut commencer par une relation simple entre un acteur et un système et trouver les moyens pour communiquer entre eux non seulement en terme de communication d'états ou d'informations mais de régulations réciproques et en temps réel. Il s'agit en quelque sorte, pour prendre une analogie de passer du miroir, instrument passif de réflexion d'image à un miroir qui renvoie une partie de son image que l'on peut grossir sans déformer, à un miroir qui donne une autre image de vous, comme un double qui perçoit l'impression que vous voulez lui transmettre comme à un public, et non à vous-même. En terme de retombées sur les interfaces des objets communicants, rien n'empêche alors d'imaginer un dialogue de collaboration dans lequel les objets reflèteront une partie de vous-même (personnalisation) et une partie de l'impression que vous souhaitez donner de vous à l'extérieur (adaptation). La mise en scène de l'objet deviendra alors une mise en scène de vous-même, de vos capacités de production et de communication dans lesquelles l'échange émotionnel et informel ne seront plus exclus.

5.1 Applications - Contexte général

Le projet *Mises en Scènes* ouvre sur un grand nombre d'application potentielles, qui relèvent potentiellement de l'art, des sciences cognitives, des interfaces homme-machine et du contrôle industriel. Le projet *Mises en Scènes* permet la représentation de nouveaux types de dispositifs interactifs véritablement multimédia. Les rapports entre les partenaires du spectacle sont modifiés. Le contenu du spectacle apparaît en même temps que sa forme. Les nouvelles relations avec l'espace et avec le public permettent d'envisager des scénographies dans des espaces très variés : évènements

multimédia interactifs, téléconférences, expositions, musées, théâtres. Sur le plan des sciences cognitives, *Mises en Scènes* est une plate-forme d'étude sur la communication dans la vie quotidienne dont le spectacle multimédia représente un cas particulier. Le système devrait améliorer les moyens d'étude dynamique de la notion de création et d'improvisation, d'analyse et compréhension d'aspects émotionnels humains à partir de capteurs variés et les développement de possibilités d'interaction non-verbale.

5.2 Un démonstrateur de technologies innovantes

Expression artistique et expression quotidienne

L'expression artistique et l'expression quotidienne se reflètent l'une dans l'autre, se nourrissent l'une de l'autre. Quelques exemples : Molière, Brecht, Becket au théâtre, Stravinsky Dvorak, Armstrong et la musique folklorique; Martha Graham, Cunningham et l'introduction de la gestuelle industrielle dans la chorégraphie contemporaine. Ce n'est pas un hasard si les termes utilisés sont les mêmes. Nous entendons fréquemment parler de scénario de la vie quotidienne quand il s'agit de décrire des situations typiques de la vie de tous les jours. Nous employons souvent le mot théâtre pour désigner le lieu de telle ou telle actualité. Les moyens d'expressions sont souvent communs. Pour ne citer qu'un exemple : la signalétique industrielle, celle des codes de conduite ou des codes de circulation, les images publicitaires utilisent les mêmes lois de couleur, la même symbolique des lignes et des formes que les plasticiens dans leur création etc. C'est l'usage des mêmes champs sémantiques qui permet la relation entre l'œuvre et le spectateur.

La métaphore de la scène est basée sur la stylisation des moyens d'expressions quotidiens. Elle est une représentation symbolique de la vie quotidienne. De la scène de la vie à la scène du spectacle, la distance n'est souvent pas très grande. C'est pourquoi le projet « Mise en scène » est à la fois un outil de création dédié au spectacle et un dispositif expérimental servant à démontrer la validité de nouveaux moyens de communication scénarisés dans le même espace. Elle est un moyen d'expérimenter dans un environnement quotidien simulé et joué une gamme complète de services.

Un environnement expérimental pour les objets communicants

Suivant les étapes du projet, nous mettrons en situation, dans le cadre de scénarii de complexité croissante, des interactions entre des utilisateurs et un certain nombre d'objets ou de dispositifs communicants. Ces objets communicants incluent des capteurs (caméras, capteurs de température, de direction, d'accélération, de contact, de distance), des dispositifs de localisation (étiquettes radio-fréquence ou tags), des systèmes de restitution (écrans de visualisations, objets témoins de feedback), des effecteurs (moteurs pas à pas, robots)ou encore des objets de communication tels que des téléphones portables ou des assistants personnels. Le dispositif simulera ainsi certains des principes d'utilisation qui pourraient être proposés à des utilisateurs finaux, qui communiqueront dans l'avenir avec les objets communicants répartis partout dans son environnement.

Un environnement expérimental pour l'interaction en langage naturel

Du fait qu'une partie importante de la mise au point du système passe par un apprentissage, supervisé par le metteur en scène lui-même, des capacités de perception et de réponse du système, il est très important que le dialogue entre le metteur en scène et le système soit le plus simple et le plus naturel possible. Quoi de plus naturel pour le metteur en scène que de diriger le système de la même manière qu'il dirige un acteur, en lui donnant des instructions orales indiquant des modifications à apporter par rapport à la dernière performance. Le dispositif proposé dans le cadre du projet Mise en Scène doit ainsi permettre de mieux comprendre comment un utilisateur pourra personnaliser son interface en lui apprenant à réagir comme il le souhaite.

Un environnement expérimental pour la capture de données bio-physiologiques

Le dispositif proposé dans le cadre du projet *Mise en Scène*, de par la mise en relation qu'il établira entre un danseur-acteur et différents dispositifs multimédia, permettra l'étude, en situation réelle, des réactions physiologiques d'un homme face à un système numérique. A ce titre, il constituera un environnement expérimental potentiellement riche pour les recherches menées par Noël Château sur la personnalisation et l'humanisation des interfaces homme-services.

Dispositif expérimental
La conduite de projet prévoit quatre étapes de réalisation qui valideront l'état d'avancement du système. Les différentes étapes correspondent à des situations de complexité croissante.
Chaque étape de la validation se fera à la fois suivant des tests technologiques simples et suivant des séries de sketchs de théâtre et de chorégraphie mettant en scène des situations de la vie de tous les jours. Ils auront pour but de vérifier la cohérence du système dans ses différentes applications : nouveaux usages technologiques dédiés à la vie quotidienne et nouveaux usages de mise en scène basés sur de nouvelles interfaces multimédia sans souris et sans clavier. Dans tous les cas il s'agit de démontrer des interactions entre acteurs/utilisateurs et un système multimédia « intelligent » via une interface multimodale.

Synergie
Cette plate-forme expérimentale permet la relation entre la problématique des objets communicants, celle des capteurs bio-physiologiques et des analyseurs de contexte vocaux dans un cadre symbolique qui préfigure le contexte global auquel ils sont destinés à être utilisés plus tard. Le croisement des situations de mises en scène de spectacle et des situations typiques de la vie quotidienne dans le même environnement technologique, constitue une situation favorable à l'émergence de nouvelles synergies. On peut s'attendre notamment à la prise de conscience de nouveaux usages et de nouveaux scénarios basés sur des interfaces plus intuitives.

6 Conclusion

De la capture d'information à leur interprétation en contexte et à la génération de solutions alternatives pour résoudre un problème professionnel ou de la vie quotidienne, mettre en scène un spectacle, les mécanismes et ingrédients sous-jacents sont les mêmes. Seuls les buts et les ressentis des situations diffèrent. Les modèles d'analyse d'activités artistiques génèrent des règles ou régularités qui permettent de maîtriser une grammaire d'expressions communicables et paramétrables, donc utilisables par des objets communicants. La technique dans ce cas ne se substitue pas à l'homme mais l'aide à comprendre, choisir et exécuter. A la fois prothèse intelligente et émotionnelle, ce supplément multimodal apporté par une maîtrise et exploitation de l'art humanisera davantage les interfaces actuelles en permettant de passant du mode commande ou « entrées sorties » à un mode dialogue ou « coopération» à un mode de relation conviviale ou « interprétation » qui donnera une tonalité et une coloration particulière à chaque interaction transformée en événement plus ou moins unique et de plus en plus adapté à chacun et à chaque public. Il reste encore bien du chemin à faire pour y parvenir mais dès aujourd'hui, la voie semble tracée et praticable pour se lancer dans des expérimentations d'usages et des prototypages techniques amorçant et accompagnant les ruptures.

7 Bibliographie

[1] A. Arcela, « Notas e cores ». http://www.lpe.cic.unb.br/literat/teoria/lit090/lit090p.html

[2] A. Berthoz, « Le sens du mouvement ». Ed. Odile Jacob, Paris, 1997

[3] J.-F. Billeter, « L'art chinois de l'écriture ». Ed. Skira

[4] G. Bonabeau et E. Theraulaz (Eds), « L'intelligence collective ». Hermès, Paris, 1996.

[5] F. Brown, « Les trois âges de la musique par ordinateur » ; recherches et applications en informatique musicale. Hermès 1998.

[6] L. Boucris, « L'espace en scène ». Ed. Librairie Théâtrale, 1993.

[7] L. Breton, J.-D. Zucker and E. Clement, Eds., A Multi-agent approach for the resolution of equations in granular physics. Multi-agent systems and Agent-Based Simulation. Boston, USA, Springer, 2000.

[8] Y. Chevaleyre and J.-D. Zucker, Noise-Tolerant Rule Induction from Multi-Instance Data. Proceedings of the ICML-2000 Workshop on Attribute-Value and Relational Learning: Crossing the Boundaries", Stanford, USA. pp. 47-52, 2000.

[9] Y. Chevaleyre and J.-D. Zucker, A framework for learning Multiple-Instance Decision Trees and Rule Sets. European Conference on Machine Learning. pp. to appear, 2001.

[10] J. Coutaz, « L'art de communiquer à plusieurs voies ». Spécial La Recherche « L'ordinateur au doigt et à

l'œil », n° 285, mars 1996, pp. 66-73.

[11] M. Cunningham, « Le danseur et la danse ». Ed Belfond.

[12] J.-L. Deneubourg, G. Theraulaz, R. Beckers, « Swarm-Made Architectures », in Towards a Practice of Autonomous Systems. MIT Press, Cambridge, pp. 123-133, 1992.

[13] A. Drogoul, « De la simulation multi-agents à la résolution collective de problèmes ». Thèse de l'Université Paris VI, novembre 1993.

[14] A. Drogoul and J.-D. Zucker, Methodological Issues for Designing Multi-Agent Systems with Machine Learning Techniques: Capitalizing Experiences from the RoboCup Challenge. Paris, LIP6, 1998.

[15] D. Humphrey, «Construire la danse ». Ed. Bernard Coutaz.

[16] G. Hutzler, « Du Jardin des Hasards aux Jardins de Données : une approche artistique et multi-agent des interfaces homme/systèmes complexes ». Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, janvier 2000.

[17] G. Hutzler et V. Renault, « Les Jardins de Données : des sociétés d'agents pour la visualisation de données complexes ». ERGO-IHM 2000, pp. 94-101.

[18] G. Hutzler, B. Gortais et A. Drogoul, « The Garden of Chances : A Visual Ecosystem », in *Leonardo*, Vol. 33, No. 2, pp. 101-106, 2000.

[19] H. Ishii et B. Ullmer, « Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms», Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '97), ACM, Atlanta, 1997.

[20] Itten, « L'art de la couleur ». Ed. Dessain et Tolra.

[21] W. Kandinsky, *Point et ligne sur plan,* éd. Gallimard, 1991

[22] R. Laban, « La maîtrise du mouvement ». Ed. Acte Sud.

[23] F. Léger, « Fonctions de la peinture ». Ed Gallimard

[24] Lelarge and J.-D. Zucker, Multi-Agent Learning in the Bar El Farol Problem: in preparation, 2001.

[25] W. E. Mackay, « Réalité augmentée: le meilleur des deux mondes ». Spécial La Recherche « L'ordinateur au doigt et à l'œil », n°285, mars 1996, pp. 66-73.

[26] A. Moukas, « Amalthaea : Information discovery and filtering using a multiagent evolving ecosystem», in Proceedings of PAAM'96, Londres, 1996.

[27] Y. Orlarey, « Musique & notations ». Ed. Aleas, 1999.

[28] F. Pachet, P. Roy ; « Musical harmonization with constraints » Constraints journal. Kluwer, édition 2000.

[29] J. Polieri, « Scénographie ». Ed. Jean-Michel Place, 1990.

[30] R. Picard, «Affective Computing ». MIT Press, Cambridge, 1997.

[31] F. Sparacino, G. Davenport et A. Pentland, « Media in performance : interactive spaces for dance, theater and museum exhibits ». Vol 39, Nos 3 & 4 – MIT Media laboratory

[32] R. Rao, « Quand l'information parle à nos yeux ». Spécial La Recherche "L'ordinateur au doigt et à l'oeil", n°285, mars 1996, pp. 66-73.

[33] L. Saitta and J.-D. Zucker, "A Model of Abstraction in Visual Perception." Applied Artificial Intelligence, 2001.

[34] E. R. Tufte, « The Visual Display of Quantitative Information ». Graphics Press, Cheshire CN, 1983.

[35] J. Wagensberg, « L'âme de la méduse ». Seuil, Paris, 1985.

[36] J. Wang and J.-D. Zucker, Solving Multiple-Instance Problem: a Lazy Learning Approach. International Conference on Machine Learning, Stanford, USA, Morgan Kaufmann Publishers, 2000.

[37] M. Weiser, « Some computer science issues in ubiquitous computing ». *Commun. ACM 36*, 7 (July), 75–84. 1993.

[38] J.-D. Zucker and Y. Chevaleyre, Comprendre et résoudre les problèmes d'apprentissage multi-instances et multi-parties. 13èmes Journées Francophones sur l'Apprentissage, Arras, France, 1998.

[39] J.-D. Zucker and Y. Chevaleyre, Solving multiple-instance and multiple-part learning problems with decision trees and decision rules. Application to the mutagenesis. Paris, France, LIP6, 2000.

****